

Parallel Numerical Analyses of Unsteady Flow Phenomena with Shock Wave/Vortex(衝撃波現象および渦を伴う非定常流動現象の並列数値解析)

著者	木下 利博
号	1992
発行年	2001
URL	http://hdl.handle.net/10097/10799

氏名	きのしたとしひろ
与学位	木下利博
学位授与年月日	博士(工学)
学位授与の根拠法規	平成13年10月10日
最終学歴	学位規則第4条第2項
学位論文題目	昭和61年3月
論文審査委員	東京大学工学部航空学科航空工学専修 卒業
	Parallel Numerical Analyses of Unsteady Flow Phenomena with Shock Wave / Vortex
	(衝撃波現象および渦を伴う非定常流動現象の並列数値解析)
	主査 東北大学教授 井上 督 東北大学教授 中橋和博
	東北大学教授 福西 祐 東北大学助教授 斎藤 務

論文内容要旨

第1章 序論

1980年代に顕著になった計算機の性能向上と記憶容量の増加により、数値流体解析(CFD)はめざましい発展を遂げてきた。さらに、1990年代の並列計算機の普及により、CFDの発展は一層加速し、衝撃波や渦を伴う非定常流動現象に関する研究においても、実験に加えてCFDが現象の理解や予測に果たす役割も大きくなってきている。本論文は、火山性の衝撃波現象や円柱後流渦の斜め放出現象など、実験が困難、あるいは実験だけでは把握しきれない流体問題に対する大規模な数値解析研究をまとめたものである。また、大規模数値解析を現実的な時間の中で進める上で不可欠となる並列計算の手法や、より少ない計算資源で高解像度の解が得られる解適合格子法の並列化手法を提案することを目的とする。

第2章 火山性爆風の数値解析

水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発を含め、これらの爆発的活動には火山性の衝撃波を伴うことが共通する特徴として認められている。この衝撃波と、その伝播に伴って発生する背後の媒体の流れとを合わせ、爆風 (blast, blast wave) と呼んでいる。本章では、雲仙普賢岳において1991年に発生した爆発現象を例に、三次元の数値解析による火山性爆風の再現を目指した。

基礎方程式には3次元オイラー方程式を用い、解法にはHartenとYeeによる2次精度のTVD (Total Variation Diminishing) スキームを採用した。また、時間進行にはStrang-typeの時分割法を適用した陽解法を用いた。本計算では、普賢岳を中心に10km四方、地上から高度4kmにわたる領域を計算領域とした。国土地理院標高数値データに基づき、水平及び垂直方向に約50m間隔で計算格子点を配置し、合計で160万の格子点を使用した。

火山爆発を数値計算上でどのように表現するかについては、2つのモデルを設定して計算を行った。ひとつは、普賢岳の火口付近に高温高压の気体を詰めた容器を考え、これが時刻 $t=0$ で破裂すると想定するものである。もう一方は、火口を開放端とする衝撃波管を想定し、衝撃波管で作られた衝撃波が火口から大気中に放出されるとするモデルである。ここでは、前者を点源爆発モデル、後者を衝撃波管モデルと呼ぶことにする。衝撃波管モデルの方が点源爆発モデルより実際の火山爆発現象に近いモデルのように見える。しかし、衝撃波管の長さ、及び高压部と低压部の比率などのパラメータを決定する根

拠となるデータに乏しいため、一定の条件を仮定したケースを点源爆発モデルと比較するにとどめ、数値解析には主に点源爆発モデルを用いた。一般に実在の爆発源から生みだされた爆風は、爆発源サイズの数倍を超えた距離では“個性”を失うため、今回の計算結果は火口近傍を除いては現実の火山爆発を模擬していると考えられる。

計算結果から、爆発によって生じた衝撃波の伝播に伴う地表面での圧力分布の変化を可視化した。地形の変化が全くない平面の場合、圧力分布は単なる同心円状に変化して行くが、可視化結果から得られた変化の様子は少し複雑になっている。いずれの時刻の分布図においても、最も外側に広がるドーナツ状の領域（1次衝撃波の正圧部分に大体一致）では、先端から内部にかけて急激に圧力が高まりピーク圧に達し、その後減少し、やがて負圧の領域が広がってくる。ピーク圧に着目すると、例えば赤松谷を経て岩床山に衝撃波がさしかかった地点で3.6気圧以上の領域が、また、眉山にさしかかった地点で1.6気圧以上の領域が見られ、これらの高圧領域が切れ切れに分布するという特徴があった。このような高圧の異常は山体斜面における衝撃波の反射によって生み出されたものである。眉山西側斜面の反射現象を例にとれば、過剰圧力値は通常の2倍程度にまで増大することが明らかになった。さらに、可視化結果から1次衝撃波に由来する負圧の継続後、相対的に弱い2次衝撃波の発生 — 伝播を明瞭にすることができる。この2次衝撃波は、爆発によって発生した高圧気体の急激な膨張運動によって膨張のオーバースhootが生じ、その回復による圧縮 — 再膨張の過程において生み出されたものと考えられる。

鉛直断面内における等圧線図から爆風内部の微細な圧力構造についても調べ、中心から外部へ伝播する圧力の高い衝撃波面とその背後の負圧領域、さらにそれらの領域内に地形の影響による非対称の複雑な圧力変動を見ることができた。また、各地点において経験する爆風による圧力履歴についても、その詳細を知ることができた。

第3章 解適合格子法の分散メモリ型並列計算機への適用

解適合格子法は衝撃波を伴う変化の激しい非定常流をより少ない計算資源で高解像度に解析する方法として非常に有効である。高解像度の解を得るためには、注目する流動現象のスケールに応じて格子を細かくしなければならないが、衝撃波は時間の経過とともに計算空間を移動する。そこで、解に応じて変化の激しい部分の格子のみを細かくし、変化が緩やかになれば再び格子を粗くする事で、計算空間全体の格子を細かくすることなく、シャープな解を得ることが可能となる。解適合格子法の並列計算機への適用を考えた場合、格子点の追加や削減を解析の途中で定期的に行うため、その並列化には難しい点が多い。例えば、分散メモリ型システムでは並列計算を行うために領域分割を行うが、領域境界付近の格子の細分化や粗大化は隣接するプロセッサが担当する領域内の格子の細分化や粗大化とも相互に関係する場合がある。他の領域に属する隣接格子点を追跡してその情報を効率よく管理する手順は煩雑である。また、局所的に格子の細分化が行われることで、プロセッサ間のワークロード（負荷）が均等にならなくなるため、効率のよい並列処理のためには何らかの方法で負荷が均等になるような負荷分散を行わなければならない。また、共有メモリ型システムでの並列化は、分散メモリ型のアプローチよりも相対的に容易であるが、キャッシュの特性の関係から並列性能が実用レベルに到らない場合が多い。本章では、これらの問題を解決し、比較的簡単な分散メモリ型の手法で解適合格子法を並列化する方法を提案する。

流れ場の解析によって得られた指標値によって格子の細分化を行っていく際、プロセッサ間で最低限の情報交換で並列に細分化を進められるようにするため、与えられた初期格子のセル内での細分化は均一に行うことにした。これにより、解適合格子の生成はかなり単純になるが、初期格子のセルの辺（エ

ッジ) 上に追加された格子点の隣接格子点の追跡を並列計算機上で行う手続きはやや複雑である。こうした手続きを容易に行うため、エッジ上の隣接格子点の数とその接続のパターンを検索表から簡単に決定する方法を提案した。格子の細分化によって、エッジ上に新たに追加される格子点がとり得る隣接格子点の並びの可能性を網羅した検索表を予め作成しておき、個々の格子点に対してはこの検索表から隣接格子点を決定することで、隣接格子点を探索する作業を省略することを意図した。また、負荷の均等化を図るため、各プロセッサは、物理的に離れた複数の部分領域を担当することにし、格子の細分化のレベルが高く格子点が集中している領域が、できるだけ多くのプロセッサに振り分けられるようにした。

並列計算の実例として、底辺の長さが 1、頂角 55° のくさび型物体によって衝撃波が回折する現象を Cray T3D で解析した。初期条件として時刻 $t=0.0$ に $x=-1.0$ (くさびの頂点を $x=0.0$ とする) に、マッハ数 1.5 の平面衝撃波とその背後の条件を与えた。図 1 は時刻 $t=2.76$ における、くさびの底角付近の等密度線図である。くさびの底角から放出されたせん断層によって形成された大きな渦構造とともに、せん断層が巻き込まれて形成された小さな渦など、流動現象の細部の特徴が鮮明に捉えられている。同時にこの計算例では、物理的に離れた複数の部分領域を各プロセッサに割り当てることで、解適合格子の導入に伴う負荷の不均衡を改善し、実用レベルの並列性能を実現できることが確認された。

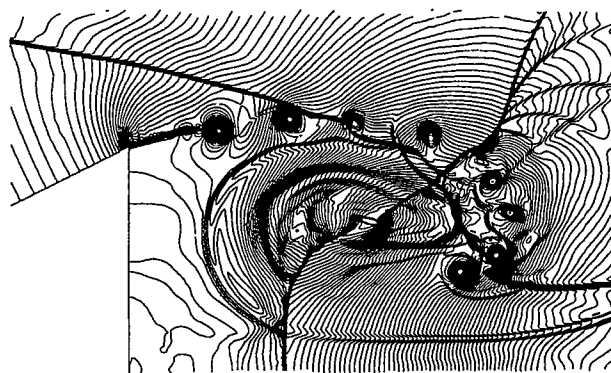


図 1 くさびの底角付近での等密度線図

第 4 章 円柱後流渦の斜め放出の数値解析

低レイノルズ数 (およそ $Re = 170$ 以下) の流れ場に置かれた有限長の円柱の後流では、渦が円柱の軸に対して斜めに放出されるという興味深い現象が観察されている。円柱が動き始めてからしばらくは円柱に平行に渦が放出され、その後比較的長い時間を要して特徴的な斜め放出モードに遷移していくことが、トーイング・タンクを使った実験によって確かめられている。本章では数値解析により渦の斜め放出モードを再現することで、平行放出モードから斜め放出モードへの遷移の過程を詳細に捕らえることを試みる。また、円柱端に円板を付けたり、その円板に角度を与えるなど円柱端の境界条件を変え、その境界条件が渦放出モードの遷移に与える影響や最終的な渦の斜め放出角度に与える影響について検討する。

基礎方程式には、三次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用い、移流項を三次風上差分、粘性項を二次中心差分で離散化した。移流項の差分法には、QUICK スキームを三次精度に拡張したスキームを採用した。時間積分には、二次精度の予測子修正子法を用いた。本章が対象としている渦の斜め放出という現象は、円柱端の境界層の影響を強く受けると考えられるため、円柱近傍には十分な格子点を配する必要性があった。格子間隔は円柱の表面近傍では径方向に $0.004D$ 、また円柱端の外側でもスパン方向に $0.004D$ として、円柱から離れていくにしたがって間隔を拡げていくようにした。数値計算のレイノルズ数は 150 としたため、境界層の中におよそ 20 の格子点が配置され、計算領域全体では約 4,700 万点という大規模なものになった。

円柱端の境界条件として、次の 3 種類の条件に対して数値解析を行った。

- (i) 自由端円柱

(ii) 端部に円柱の軸と直角に円板を付けた円柱

(iii) 前縁を 15°内側に傾けた円板を付けた円柱

図 2 は、時刻 $t = 125$ と $t = 450$ での自由端円柱後流の渦度の等値面 ($|\omega| = 0.375$) を示している。ここで、 $t = 0$ は一様流が円柱の前縁に到達した時刻とする。最初の段階では、渦はスパンのほぼ全体にわたって円柱に平行に放出されるが、その後、円柱端領域からの渦の放出周波数が残りの部分よりもやや低いため、時間が進むにつれて、それら 2 つの領域で放出周波数の不整合が生じるようになる。時刻 $t = 50$ から $t = 75$ あたりで、円柱端の部分から放出される渦の渦線が、円柱の軸に対して次第に斜めになっていく。さらに時間が進むと、円柱端領域での斜め放出の角度がさらに大きくなる。 $t = 125$ では図 2 (a) に示されるようにその角度は約 45° にまで達する。その後は、斜め放出と平行放出の境界 (オブリーク・フロント) は、円柱のスパン方向を内側に進むようになり、円柱端部の斜め放出の角度は 45° よりもかなり小さくなっていく。さらにオブリーク・フロントが内側に進行していくと、斜め放出の渦と平行放出の渦が滑らかにつながれて弧を描くような形になり、はっきりとしたオブリーク・フロントが認められなくなる。その後さらに時間が進むと、スパン中央部にあった渦線が弧を描く領域は減少していき、渦線がはっきりとした斜めの直線を示すようになる。渦放出のパターン全体としては図 2 (b) に示されるような、特徴的な山型を示すようになる。渦線が山型のパターンを示すようになると、円柱端領域からの渦放出の周波数と中央部からの渦放出の周波数が整合するようになり、渦放出のパターンは非常に安定したものになる。

円柱端に異なる境界条件を与えた数値解析結果から、円柱端の境界条件は、平行モードから斜めモードへの渦の放出モードの遷移と最終的な放出角度に大きな影響を与え、レイノルズ数が同じであっても、境界条件ごとに異なる放出角度で安定状態に達することが明らかになった。また、円柱端に付けた円板は、平行モードから斜めモードへの渦の放出モードの遷移を遅らせるとともに、最終的な渦の斜め放出角度を減少させる働きがあることが明らかになった。

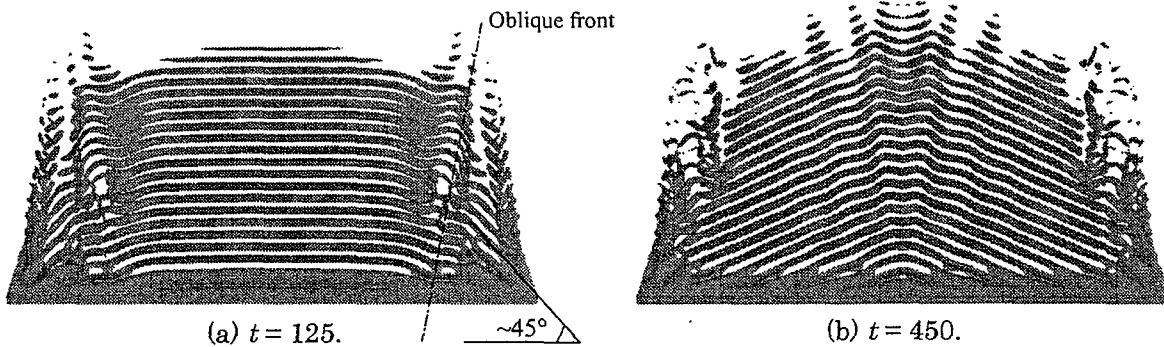


図 2 自由端円柱後流の渦度の等値面 ($|\omega| = 0.375$)

第 5 章 結論

本章では、本論文を総括し、衝撃波現象や渦を伴う非定常流動現象に対する大規模数値解析の成果とその重要性を示した。また、大規模数値流体解析における並列処理の成果についても示した。

論文審査結果の要旨

衝撃波や渦を伴う非定常流動現象に関する研究においては、実験的研究に加えて数値解析的研究が現象の理解や予測に果たす役割が大きくなってきている。数値解析的研究においては、限られた計算資源や解析時間の中で有意な結果を出す必要があり、このための優れた数値計算方法を開発することが強く求められている。

本論文は、実験が困難、あるいは実験だけでは十分理解するに至っていない流体現象に対する大規模な数値解析的研究の成果とそのために新しく開発された数値計算方法をまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、雲仙普賢岳において1991年に発生した爆発的噴火現象をとりあげ、三次元数値解析による火山性爆風現象を再現する試みについて述べている。爆発によって生じた衝撃波の伝播に伴う地表面での圧力分布の変化を可視化し、山体斜面における衝撃波の反射によって局所的な高圧領域が生み出されることを明らかにしている。また、最初に発生したこの衝撃波に続いて相対的に弱い二次衝撃波が発生し伝播する様子とそれに伴う圧力変化も定量的に明らかにしている。これらは火山活動のメカニズムを解明する上で重要な成果であるとともに、計算流体力学の発展に大きく貢献するものである。

第3章では、衝撃波を伴う変化の激しい非定常流を限られた計算資源で高解像度に解析するために、解適合格子法を分散メモリ型並列計算機へ適用することを考え、そのための合理的な方法を提案している。流れ場を解析するための格子を再構築する際に、新たに格子点が追加される場合に隣接格子点を取り得る並びの可能性を網羅したデータベースを予め作成しておくことで、隣接格子点を探索する作業を簡略化する方法を提案している。また、本方法による並列計算の実例として、平面衝撃波がくさび型物体を通過する際に回折する現象を高解像度で捕らえた解析結果を示している。これは実用性の高い独創的な成果である。

第4章では、低レイノルズ数の流れ場に置かれた有限長の円柱の後流で、渦が円柱の軸に対して斜めに放出されるという興味深い現象を数値解析した結果について述べている。平行放出モードから斜め放出モードへの遷移過程を詳細に捕らえ、そのメカニズムを明らかにすることに成功している。また、円柱端の境界条件が渦放出モードの遷移過程や渦の斜め放出角度に与える影響についても明らかにしている。これらは渦を伴う非定常流動現象を理解する上で非常に有用な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、火山性の衝撃波現象や円柱後流渦の斜め放出現象など、これまで実験のみでは十分に把握しきれなかった衝撃波現象や渦を伴う非定常流動現象を数値解析的に明らかにするとともに、大規模数値流体解析における合理的な並列処理方法の提案も行っている。他の工学的諸問題への応用も可能であり、流体力学ならびに計算流体力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。